

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 99.0.067.02 (Д 999.211.02),
созданного на базе федерального государственного автономного образовательного
учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский
политехнический университет» и федерального государственного бюджетного
учреждения науки Пермский федеральный исследовательский центр Уральского
отделения Российской академии наук,
по диссертации на соискание ученой степени доктора наук

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 14 июня 2022 г. протокол № 3
о присуждении Черновой Алене Алексеевне, гражданке России,
ученой степени доктора технических наук

Диссертация «Внутренняя газодинамика и топологическая структура локальных пространственно-временных зон с повышенным теплообменом в камере сгорания энергетических установок» по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы принята к защите 10 марта 2022 года (протокол заседания №2) диссертационным советом 99.0.067.02 (Д 999.211.02), созданным на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (614990, г. Пермь, ул. Комсомольский проспект, д. 29) и федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук (614990, г. Пермь, ул. Ленина, д. 13а) на основании приказа Минобрнауки России № 424/нк от 17.04.2018г.

Соискатель Чернова Алена Алексеевна, «10» марта 1985 года рождения, диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук защитила в 2012 году в диссертационном совете при Институте прикладной механики УрО РАН, работает доцентом кафедры «Тепловые двигатели и установки» в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Диссертация выполнена на кафедре «Тепловые двигатели и установки» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный консультант – доктор технических наук (специальность 05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели и энергетические установки летательных аппаратов), профессор **Бендерский Борис Яковлевич**, профессор кафедры «Тепловые двигатели и установки» Федерального государственного бюджетного

образовательного учреждения высшего образования «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова».

Официальные оппоненты:

1. **Емельянов Владислав Николаевич**, доктор технических наук (специальность 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы), профессор, профессор кафедры «Плазмогазодинамика и теплотехника» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова», г. Санкт-Петербург;

2. **Ремизов Александр Евгеньевич**, доктор технических наук (специальность 05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели и энергетические установки летательных аппаратов), профессор, заведующий кафедрой «Авиационные двигатели» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева», г. Рыбинск;

3. **Просвиряков Евгений Юрьевич**, доктор физико-математических наук (специальность 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы), главный научный сотрудник, заведующий сектором нелинейной вихревой гидродинамики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института машиноведения имени Э.С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург,

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук (г. Новосибирск), в своем положительном отзыве, утвержденном директором, членом-корреспондентом РАН, доктором физико-математических наук Шиплюком Александром Николаевичем и подписанном заведующим лабораторией №12 «Волновых процессов в ультрадисперсных средах», кандидатом физико-математических наук Бедаревым Игорем Александровичем и заведующим лабораторией №5 «Аэрогазодинамика больших скоростей», кандидатом технических наук Наливайченко Денисом Геннадьевичем, указала, что диссертационная работа Черновой А.А. является завершенной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение в области создания методологических основ прогноза теплового состояния конструктивных элементов камеры сгорания энергетической установки. Указано, что разработанный автором обобщенный подход, методология, алгоритмы исследования процессов нестационарного конвективного теплообмена в каналах сложной формы с массоподводом и полученные результаты могут быть использованы при

проектировании камер сгорания энергетических установок для расчета теплового состояния конструктивных элементов и расчета толщины теплозащитных покрытий, что позволит уменьшить сроки проектирования изделий. Диссертация удовлетворяет требованиям "Положения о присуждении ученых степеней", предъявляемым к докторским диссертациям.

Соискатель имеет 61 опубликованную работу по теме диссертации, в том числе 45 работ опубликовано в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для опубликования результатов диссертационных исследований на соискание ученой степени доктора наук, и приравненных к ним, из них 23 работы – в изданиях, входящих в международные базы цитирования Scopus и Web of Science (общий объем публикаций составляет 48,5 п.л., авторских – 25,3 п.л.). В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем публикациях. Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Бендерский Б.Я., Чернова А.А. Исследование теплообмена в камере сгорания РДТТ в рамках модели гомогенного газа // Химическая физика и мезоскопия. 2021. Т. 23, №4. С.412-429. **(ВАК)** 8 стр. / 5 стр.

В работе представлены полученные автором результаты исследования возможности применения модели гомогенного газа для корректного численного моделирования процессов сопряженного теплообмена в проточных трактах камеры сгорания. Показано, что применение допущения о гомогенности состава продуктов сгорания при исследовании внутренней газодинамики и теплообмена в дозвуковых областях камеры сгорания корректно и оправдано.

2. Benderskiy B., Frankovsky P, Chernova A. Numerical simulation of intrachamber process in the power plant // Applied Sciences. 2021. №11(11). P. 4990. **(Web of Science, Scopus)** 12 стр. / 7 стр.

Представлены полученные автором результаты численного моделирования нестационарной пространственной газодинамики в предсопловом объеме камеры сгорания энергетической установки с цилиндрическим целевым каналом подвода массы. Исследованы топологические особенности структуры потока и теплофизические параметры вблизи сопловой крышки. Впервые выявлена, описана и проанализирована трансформация топологических особенностей структуры потока в предсопловом объеме при изменении геометрии массового канала. Выявлена зависимость числа Нуссельта в центральной точке застоя от времени работы энергетической установки.

3. Benderskiy B.Ya., Chernova A.A. Flow structure topology in a combustion chamber during solid grain geometry charge // AIP Conference Proceedings. 2021. №2351. 030064. **(Scopus, Web of Science)**. 6 стр. / 4 стр.

В работе представлены полученные автором результаты численного моделирования пространственной газодинамики и конвективного теплообмена в предсопловом объеме камеры сгорания энергетической установки с цилиндрическо-целевой формой поверхности массоподвода для различных положений поверхности

вдува. Выявлено самоподобие профилей скорости в выходном сечении канала заряда для рассматриваемых положений поверхности подвода массы. Подтверждена корректность полученных в рамках квазистационарного подхода критериального уравнения для числа Нуссельта в центре соплового дна при перемещении и изменении геометрии поверхности подвода массы.

4. Benderskyi B.Y., Chernova A.A. Heat exchange in the back lip cavity of the large solid-propellant rocket motor // Journal of Physics: Conference Series. 2020. №1675(1). 012022. (Scopus) 5 стр. / 3 стр.

В работе представлены полученные автором результаты численного моделирования пространственной газодинамики и теплообмена в заманжетной (компенсационной) полости камеры сгорания энергетической установки. Анализируются топологические особенности структуры потока и теплофизические параметры вблизи сопловой крышки в заманжетной полости. Получены и приведены распределения коэффициента теплоотдачи по радиальной координате сопловой крышки в заманжетной полости камеры сгорания.

5. Benderskyi B.Y., Chernova A.A. Features of heat transfer in a pre-nozzle volume of a solid-propellant rocket motor with charges of complex shapes // Thermophysics and Aeromechanics. 2018. №25(2). Pp. 265-272. (Scopus, Web of Science, BAK) 8 стр. / 5 стр.

В работе исследованы локальные особенности теплофизических процессов в каналах и предсопловых объемах твердотопливных ракетных двигателей с корпусированными зарядами различной формы поперечного сечения. Исследовано влияние формы заряда на теплообмен в днище сопла. Показано, что значение числа Нуссельта в критической точке многосоплового днища определяется как формой канала заряда, так и геометрией предсоплового объема. Путем обработки результатов численного эксперимента получены критериальные зависимости для определения числа Нуссельта в областях локального увеличения интенсивности теплообмена. Проведено сравнение полученных зависимостей с известными эмпирическими формулами. Установлено, что использование эмпирических зависимостей для оценки числа Нуссельта приводит к некорректному определению параметров теплообмена на бронированных поверхностях заряда, крышках сопла и входных частях погруженного вращающегося сопла.

6. Benderskyi B.Y., Chernova A.A. Formation of vortex structures in channels with mass injection and their interaction with surfaces in solid-fuel rocket engines // Thermophysics and Aeromechanics. 2015. №22(2). Pp. 185-190. (Scopus, Web of Science, BAK) 6 стр. / 4 стр.

В работе, на основании полученных автором результатов численного моделирования, исследуются топологические особенности структуры потока продуктов сгорания в проточных трактах с различными формами поперечных сечений каналов в энергетических установках.

7. Бендерский Б.Я., Саушин П.Н., Тененев В.А., Чернова А.А. Особенности моделирования внутрикамерных процессов в энергоустановке, оснащенной

утопленным соплом // Космонавтика и ракетостроение. 2012. № 1(66). С.156 - 161. (ВАК) 6 стр. / 2 стр.

В работе, на основании полученных автором результатов численного моделирования, исследуются топологические особенности структуры потока продуктов сгорания в проточных трактах энергетической установки с каналом массоподвода звездообразной формы и утопленным соплом. Исследуются особенности реализуемых пространственных течений. Оценивается корректность различных подходов к численному моделированию внутренней газодинамики. Проводится как кроссплатформенная верификация расчетных схем и алгоритмов, так и сравнение результатов расчета с экспериментальными данными.

8. Бендерский Б.Я., Саушин П.Н., Чернова А.А. Пространственная газовая динамика в узлах энергетических установок летательных аппаратов // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2011. №1. С.8 - 11. (ВАК) 4 стр. / 2 стр.

Методами математического моделирования исследуются особенности внутрикамерных процессов, реализуемых в проточных трактах многосопловых энергоустановок и устройствах регулирования.

9. Бендерский Б.Я., Саушин П.Н., Чернова А.А. Моделирование внутрикамерных процессов в многосопловых энергетических установках // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. 2011. №1. С.31-34. (ВАК) 4 стр. / 2 стр.

Методами численного моделирования исследуется пространственная газодинамика предсоплового объема многосопловых энергетических установок, в частности исследуются вопросы влияния геометрических характеристик камеры сгорания энергетической установки на реализуемые процессы внутренней баллистики.

10. Бендерский Б.Я., Чернова А.А. Моделирование высокотемпературных внутрикамерных процессов в многосопловых энергетических установках // Химическая физика и мезоскопия. 2010. Т. 12, №3. С.301 - 306. (ВАК) 6 стр. / 5 стр.

Приведены результаты численного моделирования трехмерного высокотемпературного турбулентного течения газа в предсопловых объемах многосопловых энергетических установках. Выявлена, описана и исследована структура потока в предсопловом объеме камер сгорания энергетической установки различной геометрии. Выявлены, описаны и исследованы особенности натекания потока газа на сопловое дно для различных компоновочных схем многосопловых камер сгорания. Получено и проанализировано распределение плотности теплового потока по поверхности соплового дна энергетической установки.

На диссертацию и автореферат поступило 11 отзывов, все отзывы положительные: **Стрижак Павла Алексеевича**, доктора физико-математических наук, профессора, заведующего лабораторией теплопереноса, профессора Научно-образовательного центра И.Н. Батакова ФГАОУ ВО «Национальный

исследовательский Томский политехнический университет»; **Ваулина Сергея Дмитриевича**, доктора технических наук, профессора, заведующего кафедрой «Двигатели летательных аппаратов» ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»; **Кураева Анатолия Алексеевича**, доктора технических наук, профессора, профессора кафедры аэрогидродинамики ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»; от **Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского** (отзыв подписан сотрудниками кафедры конструкции ракет-носителей (и ракетных двигателей) С.Ю. Пироговым, доктором технических наук профессором, начальником кафедры, А.Н. Мироновым, доктором технических наук, профессором кафедры, А.Э. Султановым, кандидатом технических наук. старшим преподавателем кафедры, и утвержден заместителем начальника академии по учебной и научной работе, доктором технических наук, профессором Ю. Кулешовым); от **Сальникова Алексея Федоровича**, доктора технических наук, профессора, профессора кафедры ракетно-космической техники и энергетических систем, заведующего научно-исследовательской лабораторией «Виброакустического контроля и диагностики» ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»; **Гайнутдинова Владимира Григорьевича**, доктора технических наук, профессора, заведующего кафедрой «Конструкция и проектирование летательных аппаратов» ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ»; от сотрудников кафедры «Ракетные двигатели» ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»: **Ягодникова Дмитрия Алексеевича**, доктора технических наук, профессора, заведующего кафедрой, **Боброва Александра Николаевича**, кандидата технических наук, доцента кафедра, **Полянского Александра Ромиловича**, кандидата технических наук, доцента кафедры: от **Молчанова Александра Михайловича**, доктора технических наук, доцента, профессора кафедры 204 ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»; от **АО «Машиностроительное конструкторское бюро «Факел»** (отзыв подписан первым заместителем генерального директора, кандидатом технических наук В.В. Соколовским, начальником отдела 80, кандидатом технических наук М.В. Янцевичем, инженером-конструктора 1 категории отдела 80, кандидатом технических наук Д.В. Лебедеенко, и утвержден генеральным конструктором, доктором технических наук В.В. Дорониным); от **Марчевского Ильи Константиновича**, доктора физико-математических наук, доцента, доцента кафедры «Прикладная математика» ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»; от **Карпова Александра Ивановича**, доктора физико-математических наук, главного научного сотрудника лаборатории физико-химической механики ФГБУН «Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук».

В отзывах отмечено, что диссертация нацелена на решение важной для практики проблемы разработки обобщенного подхода к исследованию процессов теплообмена в каналах сложной формы для адекватной оценки тепловых потоков вблизи конструктивных элементов.

В отзывах содержатся следующие пожелания, вопросы и замечания: в вводной части автореферата перечислены ведущие российские научные группы и их руководители, которые получили прорывные результаты по соответствующим направлениям. Нет упоминаний о мировых достижениях, целесообразно было прокомментировать достижения исследователей из других стран и скорректировать описание новизны с учетом задела мировой науки в целом, при защите докторской диссертации определяется крупное научное направление с акцентом на мировое сообщество. Формулировки защищаемых положений представлены в общем виде, в частности «результаты расчета...», «результаты моделирования...», «результаты численного исследования...», целесообразно конкретизировать непосредственно защищаемые результаты и положения, например, строго описать установленные зависимости, эффекты, факторы, соотношения и др. в таком случае в формулировке защищаемого положения можно сразу отразить новизну, нишу и уникальность, аналогичная рекомендация касается заключения. В автореферате приведено сравнение теоретических результатов с экспериментальными данными. Необходимо подробнее описать условия эксперимента, материалы и их свойства, погрешности измерений, доверительные интервалы, а также допущения при проведении расчетов. Без этой информации сложно выполнять сравнения и оценивать адекватность теоретического подхода автора. В автореферате необходимо отразить связь диссертационной работы с проектами, грантами, программами, договорами с индустриальными партнерами. Решались разные задачи. Не везде понятна мотивация и потенциальный заказчик работы. Отсутствуют характеристики и визуализация применяемых конечно-разностных сеток, хотя данный вопрос при численном решении уравнений внутренней газодинамики является одним из основополагающих. Из автореферата не ясно, учитывается ли влияние акустических возмущений при моделировании рабочих процессов в трактах камеры сгорания энергетических установок. Отсутствует величина коэффициента теплообмена, которая использовалась при решении сопряженных задач теплообмена. В качестве объекта исследования автором выбрана камера сгорания энергетической установки, но в работе исследуются вопросы внутренней газодинамики только твердотопливного ракетного двигателя, которые обладают своими специфическими особенностями. Поэтому объект исследования, по нашему мнению, сформулирован шире, чем это рассмотрено в работе. В автореферате не нашло отражение сопоставление расчетных результатов, полученных автором, и экспериментальных, что несомненно повысило бы доверие к представленным результатам. Выполненные автором систематические расчеты в итоге были приведены к критериальным соотношениям, однако никаких сведений о точности и других статистических

характеристиках полученных выражений в автореферате не приводится. Из рис. 3 и 5 автореферата не совсем понятно, на основе каких правил и критериев проводилось сопоставление картин линий тока и топологии потока вблизи рассматриваемых элементов конструкции камеры сгорания. При горении твердого топлива в локальных зонах наблюдается значительный градиент температур, что приводит к структурному разрушению на поверхности топливного заряда в зоне горения, а следовательно, значение коэффициента теплопроводности будет нелинейный по данной зоне и его оценка в области седловых точек с использованием критериального соотношения в реферате не обоснована. Не приведена оценка влияния локальных зон горения твердого топлива друг на друга, а следовательно, не выявлены динамические закономерности структурной перестройки локальных зон во времени. Исследования зон горения методом фотографирования еще в 70 годы прошлого столетия показывают значительную неустойчивость и «миграцию» локальных зон горения по поверхности твердого топлива. Не рассмотрено влияние на конвективный тепловой поток неравномерного радиационного теплового потока, поскольку значение локальной температуры в зонах горения имеет значительный градиент по температуре, что будет приводить к изменению и давления и скорости продуктов сгорания в локальных зонах. Любая динамическая структура связана с колебательным режимом ее существования. Процессы горения, деструкции твердого топлива, газодинамическая неустойчивость в локальных зонах, вихреобразование и т.д. имеют определенные частотные характеристики, которые формируют общую картину, формирующую автоколебательную систему. Было бы неплохо, связать топологическую структуру локальных зон с амплитудно-частотными характеристиками камеры сгорания РД. Не приведены данные о временных параметрах возможности практического использования полученных результатов (на каких этапах работы энергетической установки возможно применение результатов). Отсутствует информация о непосредственном изменении формы поверхности массопровода при учете ее перемещения. Нет данных об объеме использованных выборок при построении критериальных зависимостей для оценки теплообмена. Не учтено влияние лучистого и кондуктивного теплообмена на тепловое состояние в камере сгорания энергетической установки. В автореферате не дается примеров компьютерных ресурсов (размеров сеток, времени счета и т.д.), необходимых, например, для выявления локальных топологических структур, их расположения и трансформации в камерах сгорания энергетических установок. Из автореферата не совсем понятно, как полученные результаты могут быть применены к камерам сгорания с обечайками, отличными от формы цилиндра (например, конической формы). Из приведенных картин течения видно (например, рис.12), что исследуемые явления явно относятся к процессам гидродинамики и теплообмена в сильно закрученных потоках, описание которых лишь в критериальных зависимостях типа $Nu = A \cdot Re^B \cdot Pr^C$ справедливо в узких диапазонах характерных течений, о чем свидетельствует широкий разброс коэффициентов A, B, C и требует привлечения

дополнительных критериев, учитывающих переменную кривизну течения, например, чисел Дина. В тексте автореферата отсутствуют пояснения о выделенных на рис. 13 интервалах. Из рис. 13 неясно, какой параметр отложен по шкалам топологических картин, кроме того, их цветовая индикация плохо коррелируется с временной зависимостью изменения числа Нуссельта, представленной на данном рисунке. В автореферате отсутствует обоснование выбранных временных диапазонов и не приводится обсуждение изменения внутрикамерных параметров при работе установки на всем периоде ее эксплуатации. На рис. 6 и 13 присутствуют надписи на английском языке. В представленном тексте не конкретизировано, каким образом учитывалось влияние конденсированной фазы на картину течения и теплообмен. В работе крайне сжато приведены физическая постановка задачи сопряженного теплообмена и математическая модель без системы уравнений с принятыми допущениями. Не достаточно конкретизированы полученные критериальные уравнения для чисел Нуссельта на основе данных численных экспериментов. Весьма перспективным для детального моделирования турбулентных течений представляется использование подхода LES – Large Eddy Simulation, который, однако, является более трудоемким по сравнению с решением осредненных уравнений в рамках подхода (U)RANS. В тексте же упоминания о такой возможности отсутствуют. Не вполне ясна методика определения числовых значений показателей степеней и коэффициентов в установленных критериальных соотношениях для числа Нуссельта; в зависимости от расчетного случая они даны с 1, 2 или 3 значащими цифрами. Не указано, какая платформа использовалась для проведения газодинамических расчетов (или использовались коды полностью собственной разработки?), и какова, хотя бы «по порядку величины», их вычислительная сложность. В автореферате не приводятся математические формулировки уравнений сохранения и методы их решения. Нет сомнения, что сейчас текст диссертации доступен автору отзыва на автореферат но, тем не менее, автореферат должен обладать определенным свойством самодостаточности. Источник экспериментальных данных, представленных на рис. 2 не упомянут в тексте, в отличие, например, от данных рис. 6. Не определено при каких условиях получены данные рис. 10: проведен расчет только некоторого сектора сечения с периодическими граничными условиями, либо это частичная интерпретация полного трехмерного расчета.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается следующим:

официальные оппоненты являются ведущими специалистами в области механики жидкости, газа и плазмы, имеют публикации по данному направлению в рецензируемых научных изданиях, входящих в международные базы цитирования, обладают достаточной квалификацией, позволяющей оценить новизну представленных на защиту результатов, их научную и практическую значимость, обоснованность и достоверность полученных выводов, ведут подготовку кадров

высшей квалификации в области механики;

ведущая организация, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук, хорошо известна своими достижениями в области теоретической и экспериментальной механики жидкости, газа и плазмы.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработан новый комплексный научный подход, позволяющий давать прогнозные оценки теплового состояния элементов конструкций камеры сгорания энергетических установок, базирующиеся на основе анализа структуры потока (с совокупным использованием топологических методов, теории подобия, геометрического анализа конструктивных особенностей, регрессионных и других методов обработки данных численного моделирования);

предложен обобщенный подход к исследованию процессов нестационарного конвективного теплообмена в каналах сложной формы с массоподводом с учетом движения поверхностей вдува;

с использованием предложенной методики **доказано** существование рабочих режимов энергетической установки с реализацией перестройки потока (а именно, трансформация топологических особенностей вблизи контактных поверхностей, реализуемая в виде перехода из устойчивой конфигурации в неустойчивую), сопровождаемая резким скачкообразным ростом теплового потока.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказаны преимущество использования и корректность предложенного обобщенного подхода к исследованию процессов нестационарного конвективного теплообмена в каналах сложной формы с массоподводом для последующего прогноза теплового состояния элементов конструкций камеры сгорания энергетической установки перед инженерными методиками оценки теплового состояния конструкций;

применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов) использованы методы математического моделирования внутрикамерных процессов в энергетических установках, основанные на приближенном решении нестационарной осредненной по Фавру и Рейнольдсу системы уравнений математической физики (уравнений сохранения, дополненных нестационарным уравнением теплопроводности, уравнением состояния Менделеева-Клапейрона и уравнением Сазерленда), замкнутой двухзонной моделью турбулентности Менгера реализованные методом контрольных объемов;

изложены новые результаты оценки тепловых потоков в пространственно-локальных зонах, подтверждающие согласованность результатов моделирования внутренней газодинамики и теплообмена в рамках квазистационарного подхода с результатами расчетов, выполненных в рамках нестационарного подхода;

раскрыты закономерности формирования и трансформации локальных пространственно-временных топологических структур, выявлено и показано их влияние на интенсивность тепловых потоков вблизи контактных поверхностей, в частности проанализированы условия формирования локальных топологических неустойчивостей и условия их перехода к изменению характера течения;

изучено влияние различных конструктивных параметров энергетических установок на реализуемые в камерах сгорания течения рабочего тела, а именно на топологические особенности потока, локализацию и характеристики формируемых в проточных трактах пространственно-временных зон повышенного теплообмена и на реализуемый тепловой режим;

проведена модернизация существующих математических моделей, учитывающая переменное положение поверхности массоподвода в зависимости от времени работы энергетической установки и давления в камере сгорания, позволившая получить новые результаты: 1. Впервые выявлены и описаны локальные пространственно-временные топологические зоны повышения тепловых потоков в КС ЭУ различных конструктивных схем. 2. Получены распределения тепловых потоков вблизи теплонапряженных поверхностей камеры сгорания для нестационарного и стационарного режимов работы ЭУ. Выявлена и показана количественная связь в виде критериальных соотношений между описанными топологическими зонами, их трансформацией и конвективным теплообменом в камере. 3. Для конкретных конструктивных схем энергетических установок, при их работе на стационарном режиме, впервые выявлены и описаны локальные топологические структуры, их расположение и трансформация в зависимости от изменения геометрии канала массоподвода. Получены плотности теплового потока в выявленных пространственных топологических зонах. 4. Впервые для нестационарных режимов работы ЭУ конкретных конструктивных схем выявлены локальные топологические структуры и их трансформация, в том числе описаны локальные топологические неустойчивости, формирование которых предшествует перестройке потока в КС. 5. Впервые проведено сравнение локально-временных топологических зон для квазистационарного и нестационарного режимов работы энергетических установок. Показана корреляция результатов моделирования в рамках квазистационарного подхода с результатами расчетов, выполненных в рамках нестационарного подхода. 6. Впервые на нестационарных режимах работы ЭУ выявлена трансформация топологических особенностей вблизи контактных поверхностей, реализуемая в виде

перехода из устойчивой конфигурации в неустойчивую, сопровождаемая резким (в 3.2 и более раза) ростом теплового потока. 7. Впервые при проведении численного эксперимента на нестационарных режимах получены временные зависимости изменения коэффициента теплоотдачи в центральной узловой точке и областях входа потока в патрубки. Построены критериальные уравнения, справедливые для оценки нестационарного теплообмена при $Sh \geq 7.5$ для оценки числа Нуссельта в центральной особой точке, периферийных седловых точках на сопловом дне и в области входа потока рабочего газа в патрубков.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработан проблемно-ориентированный программный комплекс модульного вида для оценки значений локальных безразмерных коэффициентов теплоотдачи в выявленных локальных пространственно-временных зонах повышенного теплообмена в КС для различных конструктивных схем энергетических установок, который **внедрен** на предприятии АО «Корпорация «Московский институт теплотехники» (г. Москва) в расчетно-конструкторской деятельности, на предприятии АО «Концерн «Калашников» (г. Ижевск) в расчетно-конструкторской деятельности, а также в учебный процесс подготовки магистров кафедры «Тепловые двигатели и установки» ФГБОУ ВО Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова;

определены возможности практического использования полученных в рамках предложенного обобщенного подхода критериальных уравнений, а также области применимости квазистационарного подхода к исследованию процессов внутренней газодинамики и сопряженного теплообмена в камере сгорания энергетической установки;

разработаны рекомендации по применению моделей турбулентности на основе осреднения по Рейнольдсу или Фавру (Reynoldsaveraged Navier–Stokes - RANS) при расчете рабочих процессов в камере сгорания энергетической установки, в частности показана и обоснована целесообразность применения модели сдвиговых напряжений Ментера (SST $k-\omega$) для исследования внутренней газодинамики и конвективного теплообмена в энергетических установках, подтвержденные сравнением с экспериментальными данными других авторов.

Результаты диссертационного исследования Черновой А.А. могут быть использованы на предприятиях, ориентированных на проектирование и создание современных энергетических установок.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

теория построена на основе законов сохранения с учетом принятых допущений, и результаты, полученные на ее основе, согласуются с опубликованными экспериментальными данными по теме диссертации;

идея базируется на обобщении и систематизации передового опыта численного моделирования рабочих процессов, протекающих в камерах сгорания энергетических установок различного исполнения с адаптацией подходов из смежных отраслей знаний к исследуемому объекту;

использованы современные методики сбора и обработки исходной информации об изучаемых явлениях, проведено сравнение полученных численных результатов с экспериментальными данными, представленными в ранее выполненных исследованиях по тематике работы;

установлено качественное и количественное соответствие авторских результатов с результатами других авторов. Сформированный обобщенный подход позволяет получить оценки теплового состояния, удовлетворяющие известным экспериментальным данным.

Личный вклад соискателя состоит в выделении и системном рассмотрении исследуемой проблемы, в постановке и решении рассматриваемых в диссертации задач по ее раскрытию, в построении, реализации, апробации и верификации математических моделей, включая вопросы оценки корректности используемых допущений, физических и математических моделей, в анализе и интерпретации полученных результатов численного моделирования. Совместно с научным консультантом и соавторами подготовлены и опубликованы статьи в научных журналах, постановка задачи и обсуждение основных результатов проводились совместно с соавторами работ.

В ходе защиты были высказаны критические замечания: 1) о не удовлетворенности отдельных членов совета уровнем зарубежных изданий, в которых были опубликованы основные результаты работы; 2) о применении в работе и в доклада неоднозначной и дискуссионной терминологии, относящейся к описанию процессу последовательного изменения характера течения газа вблизи непроницаемых поверхностей.

Соискатель Чернова А.А. ответила на задаваемые ей в ходе заседания вопросы, согласилась с высказанными в ходе защиты замечаниями и привела собственную аргументацию ответов на эти вопросы.

На заседании 14 июня 2022 г. диссертационный совет принял решение за разработку теоретических положений, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение в области создания методологических основ прогноза теплового состояния конструктивных элементов камеры сгорания энергетической установки присудить Черновой А.А. ученую степень доктора технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 16 человек, из них 8 докторов наук по научной специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 16 человек, входящих в состав совета, проголосовал: за присуждение ученой степени – 15, против присуждения ученой степени – 1, не участвовавших в голосовании – 0.

Председатель диссертационного совета 99.0.067.02
(Д 999.211.02),
доктор технических наук, профессор, академик РАН

 Матвеенко В.П.

Ученый секретарь
диссертационного совета 99.0.067.02 (Д 999.211.02),
доктор технических наук, профессор

 Щербинин А.Г.

«14» июня 2022 г.

М.П.

